专刊：科技支撑“双碳”目标实现
S&T Supporting Realization of Carbon Peak and Carbon Neutrality Goals

关键核心技术突破
Breakthroughs in Key and Core Technologies

引用格式：肖立业, 潘教峰. 关于构建以光伏发电加物理储能为主的广域虚拟电厂的建议. 中国科学院院刊, 2022, 37(4): 549-558.
Xiao L Y, Pan J F. Proposal for establishing wide-area virtual power plant based on PV-dominated energy and physical energy storage system. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(4): 549-558. (in Chinese)

关于构建以光伏发电加物理储能为主的广域虚拟电厂的建议

肖立业[1,3*]　潘教峰[2,3]

1 中国科学院电工研究所　北京　100190
2 中国科学院科技战略咨询研究院　北京　100190
3 中国科学院大学　北京　100049

摘要　实现“双碳”目标的关键问题主要涉及能源和电源结构、储能技术发展方向和新型电力系统的构建3个方面。结合我国具体情况，文章对可再生能源为主的电源结构进行了分析和预测；结合可再生能源的特点及发展需求，提出了重点发展物理储能特别是地下储能工程以满足电网规模化储能需求的观点和思路；在此基础上，进一步提出了构建广域虚拟电厂（即源侧电网）和构造新型电力系统的总体思路。

关键词　“双碳”目标，光伏发电，风力发电，物理储能，地下抽水储能，地下压缩空气储能，源侧电网，广域虚拟发电厂

DOI　10.16418/j.issn.1000-3045.20220120001

大力发展清洁低碳能源，是实现人类社会长期可持续发展和国家能源独立的必由之路。国家主席习近平于2020年9月在第七十五届联合国大会一般性辩论上庄严地向全世界宣布了我国2030—2060年碳达峰和碳中和的“双碳”目标；同年12月，习近平主席在气候雄心峰会上再次重申我国“双碳”目标承诺，并提出到2030年实现风电、太阳能发电总装机容量将达12亿千瓦以上的计划。2021年3月15日，中央财经委员会第九次会议进一步指出：要构建清洁、低碳、安全、高效的能源体系，控制化石能源总量，着力提高利用效能，实施可再生能源替代行动，深化电力体制改革，构建以新能源为主体的新型电力系统。

*通信作者
修改稿收到日期：2022年3月29日

2021年10月24日，《中共中央 国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》印发，提出了2025年、2030年、2060年3个阶段目标；到2060年，我国绿色低碳循环发展的经济体系和清洁低碳安全高效的能源体系全面建立，能源利用效率达到国际先进水平，非化石能源消费比重达到80%以上。近1年来，围绕“双碳”目标的实施路径，我国科技界和能源产业界进行了广泛的研究和讨论[1,2]①②，讨论的内容主要涉及未来一次能源和终端能源结构、储能技术发展方向和新型电力系统的构建3个密切相关的方面。笔者围绕这个议题进行了长时间的思考，文题已简要地指出了主要思路；现将一些主要观点和建议呈现给读者，以供研究或决策时参考。

1 构建以光伏发电为主的电源结构

首先大致估计了2060年我国光伏发电和风力发电总量需求。根据有关研究报告，到2060年，我国的能源消费总量将约为50亿吨标准煤，将回到2020年的水平③。根据《中国电力行业年度发展报告2021》，2020年，我国全部发电量约为7.6万亿千瓦时，占终端能源的消费比重为27%，总的终端能源消费当量为28.0万亿千瓦时。到2060年，如果我国电力占终端消费能源的比重达到80%，则我国发电量将达到22.4万亿千瓦时。综合来自不同部门和专家的测算报告[2]②③，笔者预计2060年我国各类电力装机及发电量如下：火力发电将以天然气发电为主，装机将达到7.5亿千瓦，发电量为3.6万亿千瓦时；水电装机接近6.0亿千瓦，可提供电力约2.0万亿千瓦时；核电装机将达到约2.5亿千瓦，可提供电力2.0万亿千瓦时；太阳能热发电装机2.0亿千瓦，可提供电力约为1.0万亿千瓦时；垃圾和生物质发电装机2.0亿千瓦，发电量约为1.0万亿千瓦时。因此，到2060年，还有大约12.8万亿千瓦时的能源将需要通过光伏发电或风力发电获得。以光伏发电和风力发电的平均年发电时间为1 600小时计算（我国I类地区光伏发电年有效利用时间在1 500—1 600小时及以上，全国风电平均年有效利用时间可达到2 000小时以上），则其总装机容量将达到80.0亿千瓦，占总装机容量的比重约为80%。

比较而言，光伏发电较风力发电具有多方面的优势。① 光伏发电既可以适合于建设大型发电站，也比较适合于屋顶或园区分布式发电，而风电不太合适此类分布式发电；并且，我国可资利用的屋顶或园区分布式发电资源丰富，这为充分利用分布式光伏发电创造了更有利的条件。② 光伏发电出力的波动性和间歇性较风力发电大幅降低，对电网更加友好。③ 正常情况下，光伏发电与负荷的日内功率变化曲线呈现一定的相似性，这对于减少日内功率平移量有重要意义。④ 光伏组件的回收处理比当前的风机叶片回收处理要容易得多，对环境更加友好。⑤ 从资源丰富程度上讲，我国西部和北部地区广袤的沙漠、戈壁和草原均适合建设大型光伏电站，资源潜力十分巨大。根据国家气候中心的调查报告[3]，我国陆地140米高度上风电的技术开发量约为51亿千瓦，而100米高度近海水深5—50米海域内风能资源技术开发量为4亿千瓦，技术开发总量约为55亿千瓦，即使实际开发利用其中一半，也只有约27.5亿千瓦。⑥ 更为重要的是，从经济性较大来看，经过多年的发展，光伏发电已经较风力发电显示出越来越明显的价格优势：预计未来光伏发电的上网电价将广泛低于0.1元/千瓦时，甚至可以达到0.06元/千瓦时以下（即低于1美分/千瓦时）。

① 丁仲礼. 中国碳中和框架路线图研究. 北京：中国科学院学部第七届学术年会报告, 2021-05-30.
② 李立涅. 建设新型电力系统的思考. 北京：中国电机工程学会学术年会主旨报告, 2021-12-15.
冯树臣. 发电领域低碳转型新技术. 北京：中国电机工程学会学术年会主旨报告, 2021-12-15.
③ 丁仲礼, 等. 统筹全国力量，尽快形成面向碳中和目标的技术研发体系. 中国科学院学部咨询项目课题组.

虽然风力发电的度电成本也仍有下降空间，但从长远来看，光伏发电在光伏材料、发电效率、使用寿命等方面取得更大突破进展的可能性较风力发电机要大得多，其降价潜力更大。

综上所述，光伏发电将成为未来最主要的能源。在上述光伏发电和风力发电总装机中，假设光伏发电占比 80%（64 亿千瓦）、风力发电占比 20%（16 亿千瓦），可以得到如表 1 所示的 2060 年我国电源装机及发电量预测表。

2 构建以物理储能为主的储能支持系统

2.1 可再生能源发展对储能的总体需求

众所周知，可再生能源发电特别是风力发电的出力具有随机性和波动性，光伏发电的出力具有昼夜周期性，这不仅导致电力系统调频能力不足，而且需要相应的能量系统来实现对出力的平滑或能量的平移；此外，由于光伏发电和风力机组自身不具有惯性或者惯性较低，且通过电力电子装置并网，导致电力系统等效惯量极大降低，对电力系统安全稳定性造成重大影响。为解决上述问题，需要配置多种形式的储能系统，一般包括长周期能量转移型、短周期能量转移型（日内削峰填谷）、短时间尺度功率支撑型 3 种类型。特别是，当光伏发电成为主要电源后，短周期能量平移将成为储能系统最重要的任务。

长周期的能量转移，即将可再生充足时段的能量转移至大范围内长时间阴雨天气或无风天气时之用。这种情况比较少见，难以通过配置电池储能或抽水储能等来满足要求，一般可以通过备用化石能源或可再生能源制备燃料及相应的火电机组来应对。可再生能源制备燃料主要包括生物质制燃料、电解水制氢和电解水制氢加二氧化碳制备清洁碳氢燃料等方式。根据笔者的粗略估计，以目前中试水平的电制燃料系统为例，假设光伏发电成本为 0.1 元/千瓦时，则利用光伏发电制备天然气（甲烷）的全部成本大概为 4.25 元/立方米[4]，这与当前我国部分地区城市居民用气的价格基本持平。如果制备工艺进一步成熟、制备效率进一步提高，其成本可望进一步降低，可见其未来发展潜力。长周期的能量转移，主要是解决特殊天气情况下能源电力供应的充裕性问题，与电网的短周期能量转移（日内削峰填谷）或短时间尺度功率支撑等储能需求无直接关系。

短周期能量转移用储能，主要解决因可再生能源间歇性或用电与可再生能源发电之间的短周期时间差异性所导致的功率平衡需求；而短时间尺度功率支撑

表1 我国2060年各类电源装机及发电量预测

Table 1 Forecast for China’s installed power capacity and electricity in 2060

电力装机类型	装机容量（亿千瓦）	装机容量占比（%）	发电量（万亿千瓦时）	发电量占比（%）
火电（以气电为主）	7.5	7.5	3.6	16.0
水电	6.0	6.0	2.0	8.90
核电	2.5	2.5	2.0	8.90
垃圾/生物质发电	2.0	2.0	1.0	4.45
太阳能热发电	2.0	2.0	1.0	4.45
风力发电	16.0	16.0	3.2	14.3
光伏发电	64.0	64.0	9.6	43.0
合计	100.0	100.0	22.4	100.0

需求主要用于系统惯量支撑（毫秒至秒级）、一次调频（秒至分钟级）或二次调频需求（分钟至 10 分钟级）。从功率响应特性来讲，电池储能可以用做虚拟惯量，也可以用于一次调频和二次调频；从经济上来讲，电池储能在短周期能量转移方面也可以发挥一定的作用。例如，电池作为分布式储能在短周期能量平移方面具有显著的优势。这也是电池储能研发得到广泛关注的重要原因。

2.2 物理储能比较优势分析

物理储能在短周期能量转移和短时间尺度功率支撑方面具有更加显著的优势，主要理由有 3 点。

（1）电池储能的不足。① 对于惯量支撑、一次调频或二次调频的应用场景，需要储能系统频繁充放电。电池储能虽然可以满足响应速度和放电时间上的要求，但是由于其寿命周期内的充放电次数限制，其在该应用场景下几乎没有应用的可能性。② 目前能够与抽水储能系统在储能容量上相媲美的电池储能系统仍未出现。近年来，锂离子电池储能系统事故频发，其安全性问题日益受到关注。当然，电池储能技术也处在不断发展之中，在安全性上仍有很大的改善空间，但是大量废旧电池的处理所带来的环保问题不容忽视——废弃风机叶片的回收处理问题就是例子。因此，如果有功率响应特性、经济性与电池储能相当而安全性环保性更好的物理储能系统，那么物理储能系统应该更具优势，除非电池储能不可替代。例如，在分布式储能应用场景中，物理储能在此种场合难以体现其规模效益，电池储能系统的综合优势就十分明显了。

（2）物理储能系统的优势。物理储能主要包括抽水储能、压缩空气储能、重力储能、飞轮储能、超级电容器储能、超导储能等。物理储能的共同特点是使用寿命长、环境友好、报废后处理简单容易。在惯量支撑、一次调频或二次调频应用场景，飞轮储能和超级电容器储能乃至超导储能等都是可选方案[5]；在电网中安装同步调相机组或其他处于旋转备用状态的机组均可提供惯量支撑。以天然气为主的火电机组将用做灵活电源并作为备用容量，也可大量地用于一次调频或二次调频。随着光伏发电度电成本的不断下降，通过在光伏电站预留光伏有功备用容量（over-built capacity）[6]，也是提供一次调频或二次调频功率的有效方式之一。光伏有功备用容量在不参与调频的时候，还可直接用于加热等；所获热量可以直接储存并用于灵活机组发电或供暖等，以提高其综合效益。光伏有功备用容量本质上与当前的“弃光”表面上意义相同，但在未来电网中，它将成为一种必要而合理的手段，而非当前的负面因素。总之，在惯量支撑、一次调频或二次调频应用场景，亦或更广泛意义下即高频次、快速响应、短时间尺度的容量需求场景，物理储能方法或光伏有功备用容量方案优势更加明显。

（3）物理储能系统的资源限制问题解决方案。抽水储能具有日内削峰填谷、调频、调相、平移功率、事故备用和黑启动等多种功能，是建设以新能源为主的新型电力系统的最为理想的储能方式之一。在日内削峰填谷用储能方面，压缩空气储能也是十分合适的储能系统。但是，大量的文献报道或阐述的主流观点认为：我国抽水储能资源十分有限，难以满足未来对储能系统发展的需求；而压缩空气储能系统成本高、效率相对较低，一般需要依靠盐穴等天然洞穴作为储气室才具有经济性，而盐穴等天然洞穴的资源也是十分有限的。这也是大众更多地关注电池储能的主要原因。但是，这些观点是建立传统抽水储能或压缩空气储能的实施方案不再有进步和创新的基础之上。诚然，常规抽水储能系统的建设需要依托必要的水资源和合适的地质条件及山体落差，对于建设选址的要求严格，且也有一定环保方面的考虑，因此适合于建设常规抽水储能的资源的确是有限的。对于压缩空气储能来说，现有的储气方式主要包括天然地下洞穴储气、基于金属或复合材料的高压储罐储气 2 种方式。

由于高压储气罐十分昂贵，天然地下洞穴储气似乎就成为压缩空气储能的不二选择，而天然地下洞穴资源也的确是十分有限的。然而，如果采用人工挖掘地下水库或地下储气室的方式[4]，且能保障储能系统具有足够的经济性，那么适合于建设抽水储能或压缩空气储能的资源基本上是无限制的。

2.3 大规模物理储能系统实施方案

（1）地下抽水储能。自从20世纪90年代以来，日本、新加坡和俄罗斯等国家都对基于人工地下水库的抽水储能系统进行了研究[7-9]。研究表明，在较高水头（大于800米）和适当规模情况下，基于人工地下水库的抽水储能系统的建设成本与常规抽水储能基本相当。例如，俄罗斯的地下抽水储能设计方案[9]为：上库建在地面，下库为建在地下约1 300米深的隧洞，隧洞长度为16公里、直径为12.5米。地下厂房在地下1 300米处，尺寸约为20米×60米，高度约为30—40米，厂房内安装4台可逆式水轮机组，水轮机出力各为250兆瓦，总功率为1 000兆瓦；投资预算为700美元/千瓦（约人民币4 500元/千瓦），甚至还低于常规抽水储能系统。此外，由于不需要占用山体，地下抽水储能系统占地更小、生态环保性更佳。

（2）地下压缩空气储能。虽然人造地下储气室建造成本较天然洞穴要高出不少，但比地面高压储罐成本低；而相比于天然地下洞穴储气室而言，人造地下储气室对地质结构依赖性弱，并可方便选址，可部分省去电能传输线路的基建成本和运行过程中的损耗，因而总体建设成本已经达到与抽水储能相当的水平。例如，中国科学院工程热物理研究所正在张家口建设的100兆瓦/400兆瓦时压缩空气储能系统，就采用了人工地下储气室。如果基于水压补偿方式维持压缩空气储能系统在恒压工况下充放电[10]，并将空气压缩过程中的热量回收利用，则可以将压缩空气储能系统的电-电效率提升到65%—70%[11]，而经济性有望进一步大幅度提升。图1显示在不同压强或上下库落差下，基于水压补偿的压缩空气储能系统与抽水储能系统的储能量与压强（或落差）的关系；在100个大气压（即10兆帕，对应上、下水库落差为1 000米）的情况下，压缩空气储能系统的储能量将达到抽水储能的3.5倍左右。这表明基于水压补偿的压缩空气储能系统的度电成本可以大幅度降低，甚至比抽水储能还要廉价。

21世纪以来，我国地下挖掘技术和地下工程建设

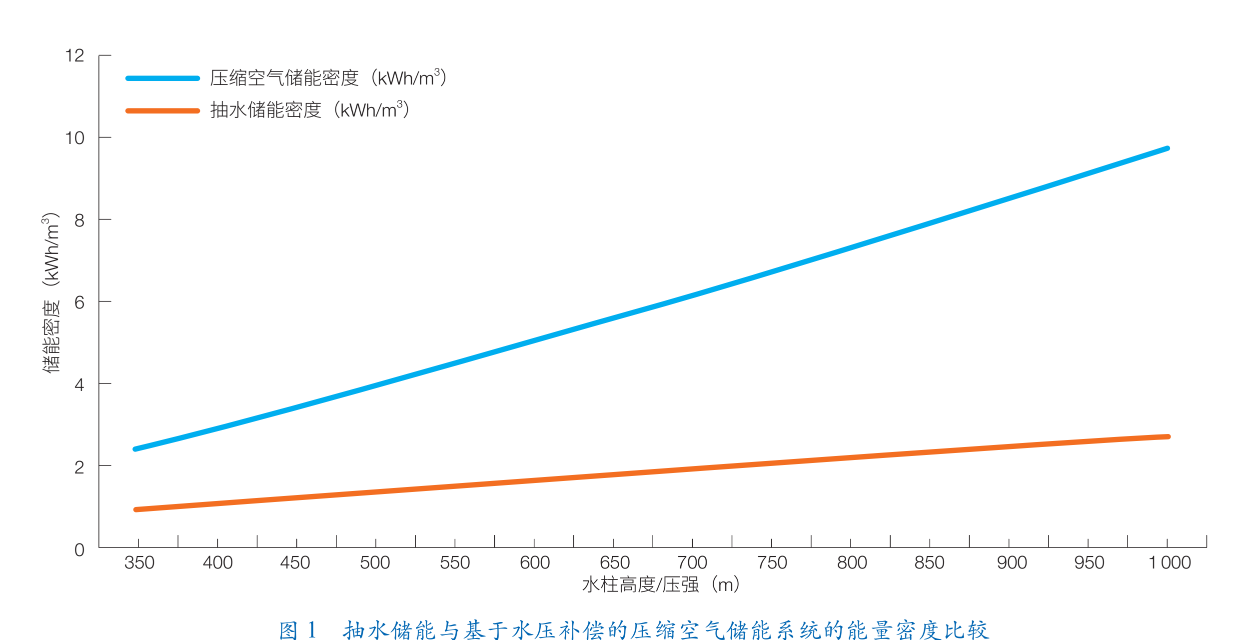


图1 抽水储能与基于水压补偿的压缩空气储能系统的能量密度比较

Figure 1 Comparison of energy density between hydro-pumped energy storage and compressed air energy storage

技术取得了长足的发展。例如，我国自主研发的大口径盾构机技术或硬岩隧道掘进机（TBM）总体上已经处于国际领先水平。我国在铁路/公路隧道、海底/河底隧道、垂直竖井/斜井、地铁、大型水电站的地下工程建设等方面突飞猛进。这些工程技术和基础设施建设方面的成就，使得我国地下工程的建设成套技术日趋成熟，建设工期和建设成本都大幅降低，为建设实用化的地下抽水储能系统和地下压缩空气储能系统奠定了坚实的基础。

基于人造地下洞室的抽水储能系统、压缩空气储能系统或两者的复合储能系统等物理储能系统不仅选址灵活、环保性好、安全性高，而且占地少、经济性好、废弃后处理容易，可望成为解决短周期能量平移所需大规模电能储存问题的根本性出路。此外，地下重力储能、地下储热及其他地下综合储能等系统也是重要的发展方向。由此可见，通过选择合理的实施方案，采用物理储能完全能够满足我国未来对储能系统的需求。

3 构建基于可再生能源的广域虚拟电厂（源侧电网）

3.1 广域可再生能源的互补性与挑战

在传统的电网中，几乎所有的电源均是可以调度的电源。因而，在电网的不断发展过程中，一般是根据新增电源的选址和负荷需求情况，在原有电网基础上叠加新的输配电线路，并经过长期的发展形成了今天的电网。近年来，虽然可再生能源不断地接入电网，但在既有电网上不断叠加电源和输配电线路的总体思路没有根本性改变。

然而，由于可再生能源不可调度且具有时变性的特点，随着可再生能源装机在电网中的占比越来越高，一方面，电网将面临一系列重大挑战，主要包括：电网的调节容量严重不足，对于灵活调频提出了重大需求；电力系统的惯量下降，导致频率稳定性问题突出；电压稳定和电压控制水平下降。另一方面，光伏发电和风力发电在广域范围内具有较强的时空互补性，在广域范围内充分利用光伏发电和风力发电的时空互补性，对于提高电网的综合效益是颇有裨益的。由于我国地域广大，各区域光伏和风力资源随时间变化曲线的相关性弱，而体现为互补性强。例如，就我国具体情况而言，国家气象数据的调查研究[12]表明：单个站点的风功率1分钟波动值最大约为20%，而10分钟波动最大值达到了100%；如果对全国主要的风电基地采用统一的输电骨干网架有机连接起来以实现风资源互补利用，则总的风功率1分钟最大波动值将降低到约2.3%，而10分钟最大波动值将降低到约9.6%。如果进一步考虑太阳能光伏发电的时空互补性，则能更加有效降低光伏发电和风力发电总体出力的波动值。此外，光伏发电短时间尺度的波动性比风力发电大为降低，且考虑到风力发电在可再生能源发电中的比例相对较低，因而就全国广域范围的可再生能源发电而言，其总功率的短时功率波动率（波动功率占总功率的比值）就会降低到更低的程度，这将极大缓解对短时间尺度储能容量或备用容量的需求。

我国“三北”地区的光伏和风电资源丰富，东部沿海也具有较为丰富的风电资源，但负荷中心主要集中在中部和东部地区，构建全国性统一电网以实现“西电东送、北电南送、各区互补”将是我国电网建设的长期格局，这就在客观上为合理利用广域范围内光伏发电和风力发电的时空互补性提供了现实基础。因此，考虑到光伏和风电资源的特点及其未来发展远景，并结合我国实际情况，对于我国输电网骨干网架的建设，需要进行全局性的谋划，而不宜继续采用过去在既有电网基础上不断叠加电源和输电线路的思维模式[13]。

3.2 未来电力系统的构建

构建设想：① 考虑到大量可再生能源按照传统模式接入现有电网所带来的系列挑战，可以构建覆盖一

个全国范围内统一的柔性直流电网，将我国主要的光伏电站、风电场、部分物理储能电站通过柔性直流换流器接入该电网，以最大程度上利用广域可再生能源的时空互补性，从而形成基于可再生能源的广域源侧电网；该源侧电网实际上也可以视为一个广域虚拟电厂[14]。② 以传统能源（火电、水电、核电）为主的传统电网（即现有电网或负荷侧电网），仍然维持以区域交流同步电网异步联网的模式，新增电源和输电线路仍然维持原有的思路和模式不变，电力用户仍然接入传统电网；同时，分布式能源通过分布式储能和用户微电网接入传统电网。③ 广域虚拟电厂（源侧电网）通过柔性直流换流器多落点地连接传统电网（也即负荷侧电网），并为传统电网提供电力；落点的输送功率根据传统电网的电力需求分布和安全稳定性约束确定。因此，广域虚拟电厂（源侧电网）便通过直流模式叠加到传统电网上，即形成“网-网叠加模式”（图 2）。④ 根据电网安全稳定运行和功率实时平衡的需求，在源侧电网直流落点的交流侧，就地连接多种物理储能系统、灵活电源（如气电）、旋转备用及电压补偿设备，以保障传统电网侧维持足够的惯量、可调节容量和电压稳定性。因此，广域虚拟电厂（源侧电网）直流落点将成为电网中的关键节点，其不仅是“两网”互联和电力输送的节点，也是维持电网稳定运行的功率调节和控制中心（PRCC）。PRCC 在本质上与换流站和变电站有根本性区别，并将成为未来电网的新生事物。⑤ 借助于多时间尺度的可再生能源功率预测预报技术和负荷预测预报技术，可以灵活地控制源侧和各落点的柔性直流换流器，不仅可实现实时功率平衡，也可在某种程度上实现一定的调度功能。同时，广域虚拟电厂（源侧电网）不仅为光伏发电厂预留了一定的备用容量，还安装有大量的物理储能系统，因而广域虚拟电厂（源侧电网）自身也可以某种程度上响应短时间尺度的功率波动性和负荷侧需求的变化。

通过以上方式构建以可再生能源为主的电网，其优点主要有：① 现有电网无须做出重大调整，而且可以按照原有模式发展和演化；高比例可再生能源接入所引起的系列问题通过构建另外一个统一的源侧电网和网-网叠加模式来解决。② 通过源侧电网实现广域范围的可再生能源资源互补利用并接入部分物理储能系统后，使得源侧电网自身具有一定程度的刚性和灵活性，因而功率调节和控制中心应对短时间尺度的功率波动就相对容易很多。③ 在满足功率实时平衡的基础上，源侧电网的各个直流换流器相对独立控制，因此源侧电网具有良好的可拓展性，从而为接入新的可再生能源电厂、新的储能设备或灵活电源、新的功率调节控制中心奠定了基础。从这个意义上讲，源侧电网也可

图 2　广域虚拟电厂（源侧电网）与传统电网（负荷侧电网）叠加构建新型电力系统
Figure 2　Future power system based on traditional power system (load side grid) and wide-area virtual power plant (power-source side grid)

视为能实现“即插即用”的综合能源平台。

4 总结与建议

4.1 总结

本文结合可再生能源的特点，对“双碳”目标下的可再生能源发展趋势进行了预测，进而对光伏发电为主的电力结构进行预测：到2060年，我国总装机将达到约100亿千瓦，其中风力发电和光伏发电装机将占80%（80亿千瓦），而光伏发电装机将达到约64亿千瓦。基于可再生能源接入电网的需求和各种储能系统的特点，本文认为物理储能特别是地下物理储能工程是解决规模化储能问题的关键出路。为应对可再生能源大量接入电网所带来的挑战并结合可再生能源的时空互补性，本文提出构建广域虚拟电厂作为“即插即用”的综合能源平台，以此形成源侧电网与传统电网（负荷侧电网）相互叠加的组网模式；而“两网”互联节点作为功率调节和控制中心，可为解决高比例可再生能源电网所面临的问题提供支撑。

4.2 建议

（1）加强相关领域的科技攻关和示范。为了促进“双碳”目标的实施，建议大力发展新型光伏发电技术以进一步降低光伏发电成本和提高其效率；大力发展地下储能工程，采用物理储能技术解决日内调峰填谷问题；布局广域虚拟电厂（源端电网）安全稳定性理论、规划设计及其关键技术、核心材料与器件、关键装备的研究，并适时开展示范工程试点的建设。

（2）积极推进相适应的电力体制改革。在可再生能源占主导的情况下，电力系统中的源网储强相关，因而在电力体制改革也要适应能源变革的需要和“双碳”目标的实施；建议不同层次上的电力系统分别由不同的企业运营，以便于对不同层次系统内的源网储进行统一协调与控制。例如，主要可再生能源电厂和储能电站及全国性的源侧电网由一家企业统一运营，区域传统电网及相关的电厂和储能系统由区域电力企业独立运营，地方电力企业则经营配电网和分布式能源，而电力用户主导微网的建设和运营。这样一来，不同层次、不同地域的电力系统各自作为一个统一整体由不同的企业独立运营、各司其职，通过相适应的规范与其他系统互联并由上一级系统协调调度。

致谢 本文在撰写过程中，得到了中国科学院电工研究所孔力、王一波、胡书举和聂子攀的有益帮助，在此向他们表示衷心的感谢！

参考文献

1 苏健，梁英波，丁麟，等. 碳中和目标下我国能源发展战略探讨.中国科学院院刊, 2021, 36(9): 1001-1009.
Su J, Liang Y B, Ding L, et al. Research on China's energy development strategy under carbon neutrality. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(9): 1001-1009. (in Chinese)

2 舒印彪，陈国平，贺静波，等. 构建以新能源为主体的新型电力系统框架研究. 中国工程科学, 2021, 23(6): 61-69.
Shu Y B, Chen G P, He J B, et al. Building a new electric power system based on new energy sources. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 61-69. (in Chinese)

3 朱蓉，王阳，向洋，等. 中国风能资源气候特征和开发潜力研究. 太阳能学报, 2021, 42(6): 409-418.
Zhu R, Wang Y, Xiang Y, et al. Study on climate characteristics and development potential of wind energy resources in China. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42(6): 409-418. (in Chinese)

4 肖立业，张京业，聂子攀，等. 地下储能工程. 电工电能新技术, 2022, 41(2): 1-9.
Xiao L Y, Zhang J Y, Nie Z P, et al. Underground energy storage engineering. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2022, 41(2): 1-9. (in Chinese)

5 中国电机工程学会. 中国电机工程学会专业发展报告2018—2019（卷二）. 北京：中国电力出版社, 2019: 270-321.
China Society of Electrical Engineering. Technology Development Report of CSEE 2018-2019 (Volum 2). Beijing:

China Power Press, 2019: 270-321.

6 杨哲涵, 熊小伏. 基于光伏有功备用的电网预防-紧急协调控制方法. 电工电能新技术, 2021, 40(7): 1-10.
Yang Z H, Xiong X F. Power grid prevention-emergency coordinated control method based on photovoltaic load shedding. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2021, 40(7): 1-10. (in Chinese)

7 田中国则, 陈天心, 李仲杰. 日本关于地下抽水蓄能电站的研究. 国际水力发电, 2004, (1): 37-40.
Tian Z, Chen T X, Li Z J. International Hydropower, 2004, (1): 37-40. (in Chinese)

8 I. H. 翁. 新加坡地下抽水蓄能电站方案. 马元珽, 译. 水利水电快报, 1997, 18(21): 31-32.
Weng I H. Underground pumped storage power plant scheme in Singapore. Translated by Ma Y T. Express Water Resources & Hydropower Information, 1997, 18(21): 31-32. (in Chinese),

9 B. H. 费利德曼. 莫斯科地下抽水蓄能电站. 夏云翔, 译. 水利水电快报, 2006, 27(14): 23-25.
Friedman B H. Moscow underground pumped storage power plant. Translated by Xia Y X. Express Water Resources & Hydropower Information, 2006, 27(14): 23-25. (in Chinese)

10 Lewis C, Young D, Thexton L, et al. Hydrostatically compensated compressed gas energy storage system: US, 2021/0207771 A1, 2021-07-08.

11 李扬, 张新敬, 宋健斐, 等. 压缩空气储能系统释能过程动态调控. 储能科学与技术, 2021, 10(05): 1514-1523.
Li Y, Zhang X J, Song J F, et al. Dynamic regulation and control of the discharge process in compressed air energy storage system. Energy Storage Science and Technology, 2021, 10(5): 1514-1523. (in Chinese)

12 刘怡, 肖立业, 王海风, 等. 中国广域范围内风能资源短时间尺度的时空互补特性调查研究. 电工电能新技术, 2014, 33(8): 49-54.
Liu Y, Xiao L Y, Wang H F, et al. Investigation on short-term temporospatial complementarities of China's wind energy resources spreading over wide area. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2014, 33(8): 49-54. (in Chinese)

13 肖立业, 刘怡, 夏孝天, 等. 高比例可再生能源接入条件下的输电骨干网架结构探索. 电工电能新技术, 2020, 39(1): 1-4.
Xiao L Y, Liu Y, Xia X T, et al. Investigation on architecture of backbone transmission system for renewable-energy-dominant power grid. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2020, 39(1): 1-4. (in Chinese)

14 肖立业, 林良真. 构建全国统一的新能源电网，推进我国智能电网的建设. 电工电能新技术, 2009, 28(4): 54-59.
Xiao L Y, Lin L Z. Construction of unified new-energy based power grid and promotion of China's smart grid. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2009, 28(4): 54-59. (in Chinese)

Proposal for Establishing Wide-area Virtual Power Plant Based on PV-dominated Energy and Physical Energy Storage System

XIAO Liye[1,3*] PAN Jiaofeng[2,3]
(1 Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
2 Institutes of Science and Development, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract The key issues to achieve the "dual carbon" goals mainly involve three aspects: the structure of energy and power supply, the development of energy storage technology and the construction of new power system. Combined with the specific situation of China, this study analyzes and forecasts the power supply structure dominated by renewable energy; Considering the characteristics and development needs of renewable energy, the viewpoint and idea are put forward to develop physical energy storage, especially underground energy storage engineering, to meet the large-scale energy storage needs of power grid. On this basis, the overall idea is suggested for constructing wide area virtual power plant and future power system.

Keywords "dual carbon" goals, photovoltaic (PV) power, wind power, physical energy storage, underground hydro-pumped energy storage, underground compressed air energy storage, power-source side grid, wide-area virtual power plant



肖立业 中国科学院电工研究所原所长、研究员。全球能源奖（Global Energy Prize）国际奖励委员会委员，国务院学科评议组电气工程组召集人，北京电工技术学会理事长等。在先进电力技术、广域可再生能源时空互补性，以及未来电网结构探索、智慧能源网和新型电力设备技术等方面做出了一系列创新成果，多次参与中国科学院和中国工程院能源方面的战略咨询研究工作。曾获国家杰出青年科学基金、中国科学院"十大杰出青年"荣誉奖章，带领团队获得国家自然科学基金创新研究群体项目。*IEEE Transaction on Applied Superconductivity*、*Cryogenics*、*CSEE Journal of Power and Energy System*等多个国内外学术期刊编委。合作发表学术论文约200篇。E-mail: xiao@mail.iee.ac.cn

XIAO Liye Professor at the Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences (CAS). He has successively served as Deputy Director and Director of the Institute of Electrical Engineering, CAS. He has accomplished a series of innovative achievements in advanced power technology, space-time complementarity of wide area renewable energy, structure for future power grid, intelligent energy network, and new power equipment technology. He has also participated in some strategic consulting and research on energy of CAS and the Chinese Academy of Engineering. He has published about 200 academic papers. In 2002, he won the National Science Fund for Distinguished Young Scholars of National Natural Science Foundation of China. In 2007, he won the honorary Medal of the "Ten Outstanding Young Scientist" of CAS, and in 2017, he led the team to be supported by the Creative Research Groups, National Natural Science Foundation of China. At present, Xiao Liye also acts as Member of the International Award Committee of the Global Energy Prize, Leader of the Electrical Engineering Group of the Discipline Review Group of the State Council, President of Beijing Society of Electro-Technology, etc. He also serves as *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, *Cryogenics*, Editorial Board Member of *CSEE Journal of Power and Energy System* and other academic journals. E-mail: xiao@mail.iee.ac.cn

■责任编辑：岳凌生

*Corresponding author